

# 基于延迟特性的改进随机 Petri 网建模与分析

刘君强<sup>1,2</sup> 左洪福<sup>1</sup> 彭智勇<sup>2</sup>

(南京航空航天大学民航学院 南京 210016)<sup>1</sup> (武汉大学计算机学院 武汉 430072)<sup>2</sup>

**摘要** 随机 Petri 网能够分析过程中的随机特性,但是不能有效地描述延迟和花费问题。为了解决上述问题,提出了一种基于延迟特性的随机 Petri 网模型。该模型能根据延迟时间和过程的随机性得到总的时间和花费特性。给出了状态类延迟时间和延迟花费的串联及并联化简方法。最后,通过首都机场的实例说明该方法能更好地表示出应急救援的时间和花费特性。

**关键词** 延迟特性,随机 Petri 网,应急救援

**中图分类号** TP311 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.3.036

## Modeling and Analysis of Improved Stochastic Petri Net Based on Delay Characteristics

LIU Jun-qiang<sup>1,2</sup> ZUO Hong-fu<sup>1</sup> PENG Zhi-yong<sup>2</sup>

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)<sup>1</sup>

(Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Random characteristics can be analyzed by stochastic Petri net, but delay time and delay cost problem cannot be computed by stochastic Petri net. In order to solve above problem, a stochastic Petri net model based on delay characteristics was proposed. The delay time and delay cost were analyzed using the model proposed in this paper. The serial and parallel simplification method about delay time and delay cost were studied. Finally, an example of the capital airport shows that the method can represent the emergency rescue time and cost characteristics better than traditional one.

**Keywords** Delay characteristics, Stochastic Petri nets, Emergence rescue

## 1 引言

面向服务计算 SOC(Service Oriented Computing)<sup>[1]</sup>是一种基于 Internet 的全新计算模式。Gartner 预测,到 2016 年,面向服务的体系架构将成为 80% 开发项目的基础,它将结束传统的整体软件体系架构长达 40 年的统治地位,成为占有绝对优势的软件工程实践方法<sup>[2,3]</sup>。Petri 网已经在云计算、服务组合、企业过程评价或应急救援等领域得到了广泛的应用。何炎详等<sup>[2]</sup>给出了一个详细完整的随机 Petri 网模型转换为同构马尔科夫链的算法,并设计开发了一个软件平台进行测试和验证。李迁等<sup>[3]</sup>针对工程突发事件的随机性特征,运用广义随机 Petri 网对事故应急处置流程进行过程建模,利用广义随机 Petri 网与马尔科夫同构特性构建其可达图,并分析模型的活性和有界性;同时以工程突发事件应急处置流程为例进行仿真分析。何炎详等<sup>[4]</sup>针对如何有效发现 Web 服务组合中性能瓶颈的问题,提出一种基于随机 Petri 网的 Web 服务组合性能分析模型,并给出了 Web 服务组合性能瓶颈定位策略。范贵生等<sup>[5]</sup>提出了可靠服务组合的协调策略与分析方法,通过旅游服务实例演示了协调技术的应用方法及其可行

性。

目前的形式化验证方法的不足是没有考虑到 Web 服务的延迟特点,并且由于有色 Petri 网缺乏时间信息而无法对组合服务的性能进行准确的分析。美国 HP 公司研究表明,普通的 Web 用户通常不会忍受超过 8~10 秒的等待时间<sup>[6]</sup>;Zona 研究中心的统计表明,一个电子商务网站必须保证其 Web 用户在 7 秒内得到响应,否则将损失 30% 或者更多的客户<sup>[7,8]</sup>。如何更准确地分析 Web 组合服务的性能是目前 Web 组合研究的重要内容之一<sup>[9,10]</sup>。

本文结合延迟时间和花费的特点,建立改进的随机 Petri 网模型。该模型把 Web 服务组合时间分为正常过程时间和延误时间,把过程花费分为正常过程花费和延迟时间花费,能更好地体现实际 Web 服务组合过程的特性。

## 2 改进随机 Petri 网

**定义 1(改进随机 Petri 网)** 改进随机 Petri 网是一个十一元组  $TPN = (P, T, B, F, M_0, \lambda_N, \lambda_D, V_N, V_D, \mu_N, INF)$ 。

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  是有限的非空的置集;  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  是有穷非空的变迁集,且  $P \cap T = \emptyset$ ;  $B: T \times P \rightarrow N$  是向后

到稿日期:2014-04-24 返修日期:2014-07-02 本文受国家自然科学基金重点项目(61232002),江苏高校哲学社会科学项目(2014SJD041)资助。

刘君强(1978—),男,博士,讲师,主要研究方向为民航交通信息控制与管理、航材预测与库存管理,E-mail:liujunqiang@nuaa.edu.cn;左洪福男,教授,主要研究方向为交通运输管理、发动机健康管理、交通信息控制与管理;彭智勇(1986—),男,博士,教授,主要研究方向为 Web 数据管理、复杂数据管理等,E-mail:peng@whu.edu.cn。

关联函数;  $F: T \times P \rightarrow N$  是向前关联函数;  $M_0: P \rightarrow N$  是初始标识。与正常时间变迁集相关联的平均变迁实施速率集合为  $\lambda_N = \{\lambda_{N_1}, \dots, \lambda_{N_k}\}$ , 与延误时间变迁集相关联的延迟平均时间变迁速率集合表示为:  $\lambda_D = \{\lambda_{D_1}, \dots, \lambda_{D_k}\}$ ;  $V_N$  是变迁使能及实施的代价函数, 定义为:

$V_N: T \rightarrow Expression; \forall t \in T: [TypeVDy = R \wedge y \subseteq [\alpha, \beta]]$   
表示当变迁在时间区间  $[\alpha, \beta]$  内实施时, 变迁在延迟  $y$  个时间单位后执行的实施花费。  $\mu_N$  是区间内变迁使能的代价函数, 定义为:

$\mu_N: T \rightarrow Expression; \forall t \in T: [TypeVDy = R \wedge y \subseteq [\alpha, \beta]]$   
表示当变迁使能时, 在时间延迟区间  $[\alpha, \beta]$  内, 由于使能变迁延迟  $y$  个时间单位所花费的花费。初始函数,  $INF: P \rightarrow Expression$  为每个库所上生成初值时的标识  $M_0$ 。

**定义 2(时间变迁系统)** 定义为一个代价时间变迁系统  $((S, s_0, \rightarrow), Probability)$ , 其中:  $s_0 = (M_0, d_0)$  为初始状态,  $cost$  是一个从  $\rightarrow$  映射到  $R^+$  的代价函数, 表示变迁的代价。  $\rightarrow \in S \times (R^+ \cup T) \times R \times S$  为变迁关系:

$$\forall x \in R^+, (M, d) \xrightarrow{x, ep_x} (M, d+x)$$

$$\text{iff} \begin{cases} \forall t \in enable(M); (d(t)+x) \leq \beta(t) \\ ep_x = probability_y((M, d) \xrightarrow{x} (M, d+x)) \\ = \sum_{\forall t \in enable(M)} \mu_t(d(t)+x) - \mu_d d(t) \end{cases}$$

为连续的变迁关系分别建立了一个成本函数, 这保证了: 1) 消耗的使能成本为所有使能变迁的成本之和; 2) 任何变迁每实施一次所消耗的成本等于在延迟时间  $d(t)$  下该变迁相应的实施价格。

**定义 3(执行代价)** 在状态类  $(M, D)$  下, 一个变迁  $t_i$  的执行的代价由两部分组成: 1) 从使能到执行时正常的使能代价表示为  $k_{i_1} \times (1/\lambda_{iN})$ ; 2) 变迁  $t_i$  的相应延误代价  $k_{i_2} \times (1/\lambda_{iD})$ 。因此, 一个变迁  $t_i$  实施的代价  $TP_{t_i}$  定义为:  $TP_{t_i} = [k_{i_1} \times (1/\lambda_{iN}) + k_{i_2} \times (1/\lambda_{iD})]$ 。

**定义 4(累积代价)** 累积代价状态类  $SPC$  是一个三元组  $(M, D, SP)$ , 其中  $M$  是一个标识,  $D$  是状态类的实施域,  $SP = [a, b]$  是状态类的累积代价区间。

**定义 5(累积代价状态类图)** 累积代价状态类图  $SPCG$  是一个变迁系统  $TSE_{SPCG} = (SPC, spc_0, \rightarrow)$ , 其中,  $SPC$  为状态类集合;  $spc_0$  为初始状态, 为  $(M_0, D_0, [0, 0])$ ;  $\rightarrow \in SPC \times T \times SPC$ , 标识状态间的变迁关系, 定义如下:

$$(M, D, SP) \xrightarrow{t_i} (M', D', SP') \text{ iff} \begin{cases} t_i \in enable(M) \\ M[t_i] > M' \\ D' = next(D, t_i) \\ SP' = SP + TP_{t_i} \end{cases}$$

这里,  $D' = next(D, t_i)$  为变迁  $t_i$  实施后的下个区域。为了计算累积代价, 本文通过一个变迁系统定义了累积代价状态类  $SPC$  间的变迁关系, 以及相应变迁关系的累积代价计算方法。在状态  $(M, D, SP)$  下, 变迁  $t_i$  实施后到达状态  $(M', D', SP')$ , 此时累积代价  $SP'$  等于前一个状态类  $SPC$  的累积代价  $SP$  加上执行变迁  $t_i$  所消耗的代价  $TP_{t_i}$ 。

**定义 6(一个延迟代价区间)**  $\varphi = [1/\lambda_{max}, 1/\lambda_{min}]$ , 其中  $1/\lambda_{min}, 1/\lambda_{max} \in R$ 。设  $\varphi_1 = [1/\lambda_{1max}, 1/\lambda_{1min}]$ ,  $\varphi_2 = [1/\lambda_{2max}, 1/\lambda_{2min}]$ , 这里  $Cont$  为常数且  $Cont \in R^+$ , 代价区间的运算规则如下:

$$\varphi_1 + \varphi_2 = [1/\lambda_{1max} + 1/\lambda_{2max}, 1/\lambda_{1min} + 1/\lambda_{2min}]$$

$$\varphi_1 \times Cont = Cont \times [1/\lambda_{1max}, 1/\lambda_{1min}]$$

$$Cont + \varphi_1 = [Cont + 1/\lambda_{1max}, Cont + 1/\lambda_{1min}]$$

根据定义 3 和定义 6, 执行所花费的代价包括正常执行的代价和延误执行的代价。因此, 一个变迁  $t_i$  实施的代价  $TP_{t_i}$  也可定义为:

$$TP_{t_i} = k_{i_1} \times (1/\lambda_{iN}) + [k_{i_2} \times (1/\lambda_{iDmax}), k_{i_2} \times (1/\lambda_{iDmin})]$$

因此, 实施代价是一个区间值。

**定义 7** 在状态类  $(M', D')$  下一个变迁  $t_i$  的触发代价区间为  $TP_{t_i}$ , 定义为:

$$TP_{t_i} = [\min \mu_{t_i}(y_i), \max \mu_{t_i}(y_i)]$$

**定理 1** 具有延误函数的代价计算方法是合理的。

证明: 使用数学归纳法。

1) 设从  $(M_0, D_0, [0, 0])$  到  $(M_n, D_n, SP_n)$  的一个变迁序列为  $t_0, t_1, \dots, t_n$ 。当  $n=0$  时,  $(M_n, D_n, SP_n) = (M_0, D_0, [0, 0])$ , 其代价为  $[0, 0]$ 。定理成立。

2) 假设在  $n \leq k$  的情况下成立, 那么  $SP_k$  是代价区间。当  $n=k+1$  时, 根据定义 6 可得  $SP_{k+1} = SP_k + TP_{t_{k+1}}$ 。

**定理 2** 累积函数代价计算是完备的。即任意一个变迁序列的总实施代价必定在区间内。

证明: 使用数学归纳法。

设从  $(M_0, D_0, [0, 0])$  到  $(M_n, D_n, SP_n)$  的一个变迁序列为  $t_0, t_1, \dots, t_n$ , 实施的总代价为  $SUM_n$ 。

1) 当  $n=0$  时总代价为 0, 初始代价区间为  $SP_0 = [0, 0]$ 。显然,  $SUM_0$  在区间  $SP_0$  内, 定理成立。

2) 假设当  $n \leq k$  时定理成立, 即  $SUM_k$  在区间  $SP_k$  内, 当  $n=k+1$  时, 根据定义 7 和定义 6 可得  $TP_{t_{k+1}}$  为变迁  $t_{k+1}$  实施所消耗的代价区间, 那么变迁  $t_{k+1}$  实际消耗的代价  $ep_{k+1}$  必定在区间  $TP_{t_{k+1}}$  内。又因为  $SUM_{k+1} = SUM_k + ep_{k+1}$ , 所以  $SUM_{k+1}$  肯定在代价区间  $SP_k + TP_{t_{k+1}}$  内。由定义 5 可得:  $SP_{k+1} = SP_k + TP_{t_{k+1}}$ 。

### 3 改进随机 Petri 网模型的化简

根据随机 Petri 网性能等价公式<sup>[8]</sup>, 可以知道串联、并联、循环情况下的化简方法。本文在这些化简方法的基础上, 提出了带有随机延迟的串联、并联情况下的化简方法。

**定理 3** 串联情况下的性能等价公式为  $\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{iN}} + \frac{1}{\lambda_{iD}}$ 。

证明: 首先推导由两个变迁  $t_1, t_2$  组成的串联的子系统的性能等价公式。

为了求两个变迁串联的性能等价公式, 将这两个变迁组成一个活的, 标记守恒的分析系统, 如图 1 所示, 位置  $S_1$  中设置了一个初始标记。

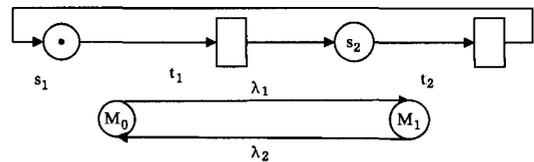


图 1 两个变迁组成的 Petri 网图

解此分析网, 得到稳定状态方程  $\begin{cases} \lambda_1 p_1 = \lambda_2 p_2 \\ p_1 + p_2 = 1 \end{cases}$ , 求解稳定

状态概率为： $p_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$ 。

因此，求得网的标记平均输入速率： $\lambda = \lambda_1 p_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ 。

由 Little<sup>[8]</sup>式知， $\lambda$  就是变迁串联分析网的平均实施速率。则图中分析网的一个标价平均延时为： $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$ 。

因此，在  $k=2$  时成立。

由两个变迁串联的情况推广到由  $n$  个变迁的串联  $t_i$  ( $1 \leq i \leq k$ ) 组成时，它的等价变迁  $t$  的实施速率  $\lambda$  可由  $\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\lambda_i}$  给出，其中  $\lambda_i$  是网中与变迁  $t_i$  相联系的平均实施速率。

现用数学归纳法证明：假定当  $k=n-1$  时成立，即有  $\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\lambda_i}$ 。

可将  $n-1$  个变迁使用一个非基本变迁<sup>[8]</sup>替代， $t'$  的实施速率为  $\lambda'$ 。当  $k=n$  时，可将网看成由变迁  $t'$  和  $t_n$  组成，因已证明  $k=2$  时成立，所以有  $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda'} + \frac{1}{\lambda_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i}$ 。

因此，对于每一个变迁  $t_i$ ，实施速率为  $\lambda_i$ ，若该实施包括通常时间的  $\lambda_{iN}$  和延迟时间的  $\lambda_{iD}$ ，也可得到  $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_{iN}} + \frac{1}{\lambda_{iD}}$ ，根据  $\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i}$ ，可知  $\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{iN} + \lambda_{iD}}$ 。

**定理 4** 并联情况下性能等价的期望值为：

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{iN}} + \frac{1}{\lambda_{iD}} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{\frac{\lambda_{iN} \times \lambda_{jD}}{\lambda_{iN} + \lambda_{jD}} + \frac{\lambda_{jN} \times \lambda_{iD}}{\lambda_{jN} + \lambda_{iD}}} + \\ & \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \frac{1}{\frac{\lambda_{iN} \times \lambda_{jD}}{\lambda_{iN} + \lambda_{jD}} + \frac{\lambda_{jN} \times \lambda_{kD}}{\lambda_{jN} + \lambda_{kD}} + \frac{\lambda_{kN} \times \lambda_{iD}}{\lambda_{kN} + \lambda_{iD}}} + \\ & \dots (-1)^{n-1} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{iN} \times \lambda_{iD}}{\lambda_{iN} + \lambda_{iD}}} \end{aligned}$$

证明：因为  $n$  个相互独立的顺序统计量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  分别服从参数为  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  的指数分布函数，设  $n$  个并联变迁组成的系统的性能等价延时为  $y$ ，由  $n$  个变迁并联所组成的系统总的延时的物理意义及引理可知，该系统的分布函数为：

$$\begin{aligned} F(y) &= F_{X(n)}(y) \\ &= \Pr(X(n) \leq y) = \Pr(\text{所有的 } X_i \leq y) \\ &= (1 - e^{-\lambda_1 y})(1 - e^{-\lambda_2 y}) \dots (1 - e^{-\lambda_n y}) \end{aligned}$$

其概率密度为：

$$\begin{aligned} f(y) &= F'(y) \\ &= \sum_{i=1}^n \lambda_i e^{-\lambda_i y} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (\lambda_i + \lambda_j) e^{-(\lambda_i + \lambda_j) y} + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n (\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k) e^{-(\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k) y} + \dots + (-1)^{n-1} \sum_{i=1}^n \lambda_i e^{-\lambda_i y} \end{aligned}$$

则性能等价延时的期望值为：

$$\begin{aligned} E(y) &= \int_0^{\infty} y f(y) dy \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \end{aligned}$$

因此，对于每一个变迁  $t_i$ ，实施速率为  $\lambda_i$ ，若该实施包括通常时间的  $\lambda_{iN}$  和延迟时间的  $\lambda_{iD}$ ，即  $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_{iN}} + \frac{1}{\lambda_{iD}}$ ，则有  $\lambda_i =$

$\frac{\lambda_{iN} \times \lambda_{iD}}{\lambda_{iN} + \lambda_{iD}}$ ，可以得到性能等价的期望值为：

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{iN}} + \frac{1}{\lambda_{iD}} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{\frac{\lambda_{iN} \times \lambda_{jD}}{\lambda_{iN} + \lambda_{jD}} + \frac{\lambda_{jN} \times \lambda_{iD}}{\lambda_{jN} + \lambda_{iD}}} + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \frac{1}{\frac{\lambda_{iN} \times \lambda_{jD}}{\lambda_{iN} + \lambda_{jD}} + \frac{\lambda_{jN} \times \lambda_{kD}}{\lambda_{jN} + \lambda_{kD}} + \frac{\lambda_{kN} \times \lambda_{iD}}{\lambda_{kN} + \lambda_{iD}}} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{iN} \times \lambda_{iD}}{\lambda_{iN} + \lambda_{iD}}} \end{aligned}$$

## 4 算例分析

### 4.1 算例分析

Petri 网变迁的正常服务执行时间范围  $t_N = [1/\lambda_{iN_{\max}}, 1/\lambda_{iN_{\min}}]$ ，变迁的延迟执行时间范围为  $t_D = [1/\lambda_{iD_{\max}}, 1/\lambda_{iD_{\min}}]$ 。使用本文提出的方法对一个机场应急救援的 Web 组合服务建模(见图 2)，为了简化，在图 2 中直接给出了正常服务时间和延误时间的具体数值。变迁  $t_1$  表示现场指挥部收集现场资源和人员等情况需要的时间，后面的  $t_3$  和  $t_4$  分别是 Little 和 Normal 下的消防组灭火时间， $t_2$  为医疗救护服务。4, 10, [0.9, 1], 5 表示服务质量，4 是正常服务的时间花费，每单位时间的服务花费为 10，延误的时间范围为 [0.9, 1]，延误的单位时间花费为 5。

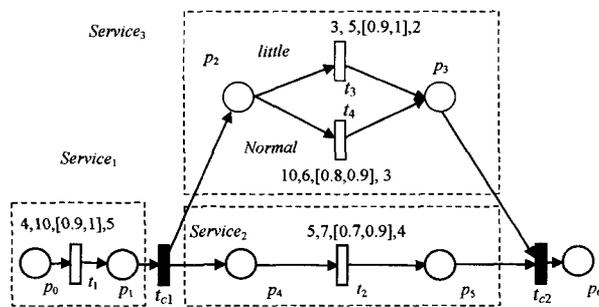


图 2 服务组合的 Petri 网模型

使用状态类方法对模型作可达性分析，该 Web 组合服务的可达图如图 3 所示。在不考虑 Web 服务之间控制操作的情况下，到达终止状态有 4 种变迁序列：(1)  $t_1, t_2, t_4$ ；(2)  $t_1, t_3, t_4$ ；(3)  $t_1, t_4, t_2$ ；(4)  $t_1, t_4, t_3$ 。图 3 给出了变迁序列的花费。例如，变迁序列  $t_1, t_4, t_2$  的花费是 135，时间为 19，延误产生的花费为 [9.7, 12.2]，延误时间范围为 [1.7, 1.9]。

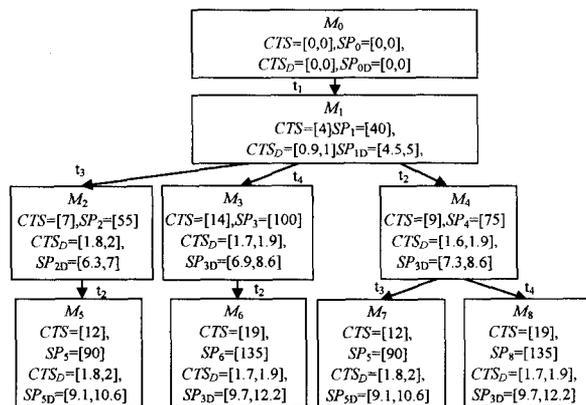


图 3 累积状态花费图

表 1 给出了不考虑延误、考虑延误和首都机场实际演练 3 种情况下机场应急救援服务组合的性能情况。表 1 中的时

间单位为分钟,花费单位为百元。可以看出,本文提出的方法比不考虑延误的情况更符合首都机场实际演练的情况。

表 1 数据分析表

状态	时间	不考虑延误		本文方法		演练	
		时间	花费	时间	花费	时间	花费
严重	2013.3.4	135	19	[144.7,147.2]	[20.7,20.9]	145.83	20.8
情况	2013.9.5	135	19	[144.7,147.2]	[20.7,20.9]	146.23	20.7
一般	2013.3.4	900	12	[99.1,100.6]	[13.8,14]	99.68	13.9
情况	2013.9.5	900	12	[99.1,100.6]	[13.8,14]	99.42	13.8

本文的方法可推广到其他制造或生产领域。例如一个简单的机器加工 Petri 网包括工件到达、开始加工、工件包装和输出工件 4 个变迁。这些变迁活动如果有了延误时间,必然对企业产生经济损失。分析这些变迁产生延误时间和延误花费对制造企业具有重要意义。

对于设备的维修 Petri 网(包括飞机、舰炮等),例如一个简单的维修过程包括故障诊断、维修活动、维修后测试等变迁。维修活动需要人的参与,会产生延误花费。分析维修过程中产生的延误时间和延误花费同样具有重要意义。

另外,对于旅行定制的 Web 服务建模和性能分析,可以对 Web 服务的正常服务时间和延迟时间特性进行分析。目前,还没有对 Web 服务的延迟时间进行花费计算的方法,有了该方法后,也可对其进行延误费用的计算。

#### 4.2 相关工作比较和分析

目前,在各种实时系统的建模和分析中,时间是一个重要的因素<sup>[1]</sup>。由于 TPN(Time Petri Nets)网<sup>[2]</sup>能够在对系统功能建模的同时表达相应的时间、资源和容量等约束,因此,TPN 网在需要性能和时间分析的实时系统建模中得到广泛应用。杨琰等<sup>[11]</sup>提出了基于 Petri 网的顾及转向延误的最优路径算法。贾国柱<sup>[12]</sup>提出了基于时间性能的制造企业生产系统流程再造方法。

Stochastic Petri nets<sup>[4]</sup>主要用来分析系统时间性能和花费的研究。在这些研究中,对于正常服务时间的研究内容较多。何炎详等<sup>[13]</sup>提出了一种基于随机 Petri 网的 Web 服务组合性能瓶颈定位策略。刘勇等<sup>[14]</sup>提出了一种基于随机 Petri 网的舰炮维修过程。林闯等<sup>[15]</sup>提出基于随机 Petri 网的系统性能评价。文献<sup>[16]</sup>等提出了用户体验的质量模型分析与评价方法。

对于 Stochastic Petri nets,目前的研究都无法提供延迟服务时间及它们的花费的计算。在我们的方法中,能根据延迟时间和过程的随机性得到总的时间特性和花费特性。这些改进能有效分析应急救援的演练状况,同时,该方法可扩展到制造生产、维修等其它领域中。

**结束语** 本文提出了基于延迟特性的改进随机 Petri 网建模方法,该方法能根据延迟时间和过程的随机性得到总的时间特性和花费特性;给出状态类延迟时间和延迟花费的串联和并联化简方法;最后通过实例,说明了该方法在机场应急

救援方面具有更好的表达能力。下一步,我们将研究具有循环特征的随机 Petri 网的延迟特性。

#### 参 考 文 献

- [1] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2003
- [2] 何炎详,沈华. 随机 Petri 网模型到马尔科夫链的转换算法的证明[J]. 小型微型计算机系统,2014,35(2):339-341
- [3] 李迁,刘亚敏. 基于广义随机 Petri 网的工程突发事故应急处理流程建模及效能分析[J]. 系统管理学报,2013,22(2):162-167
- [4] 何炎详,沈华. 一种基于随机 Petri 网的 Web 服务组合性能瓶颈定位策略[J]. 计算机学报,2013,36(10):1955-1965
- [5] 范贵生,刘冬梅,陈丽琼,等. 可靠服务组合的协调策略与分析[J]. 计算机学报,2008,31(8):1445-1457
- [6] 张佩云,黄波,孙亚民. 基于 Petri 网的 Web 服务组合模型描述和验证[J]. 系统仿真学报,2007,19(12):2872-2876
- [7] 马炳先,相东明,张正明. Web 服务组合的 Petri 网自动生成方法[J]. 小型微型计算机系统,2013,34(2):332-337
- [8] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社,2005
- [9] Girault C, Valk R. Petri Nets for Systems Engineering: A Guide to Modeling, Verification, and Applications[M]. Berlin: Springer-Verlag,2003:473-566
- [10] Liu X M, Li S X, Jiang Y. A Petri net extended with stochastic priced transition[C]//The 2005 IEEE Int'l Conf. on e-Business Engineering; Los Alamitos: IEEE Computer Society. 2005:545-548
- [11] 杨琰,廖伟志,等. 基于 Petri 网的顾及转向延误的最优路径算法[J]. 计算机工程与设计,2013,34(10):3643-3648
- [12] 贾国柱. 基于 Petri 网建模与仿真的制造企业生产系统流程再造方法[J]. 系统工程,2007,25(3):46-55
- [13] 何炎详,沈华. 一种基于随机 Petri 网的 Web 服务组合性能瓶颈定位策略[J]. 计算机学报,2013,36(10):1953-1965
- [14] 刘勇,徐廷学,周洪庆. 基于扩展广义随 Petri 网的舰炮维修过程模型[J]. 舰船科学技术,2013,35(8):138-142
- [15] 林闯,李雅娟,单志广. 基于随机 Petri 网的系统性能评价[J]. 清华大学学报:自然科学版,2003,43(4):475-479
- [16] 林闯,胡杰,孔详震. 用户体验质量(QoE)的模型与评价方法综述[J]. 计算机学报,2012,35(1):1-15